

无线通信技术在高速列车网络控制系统中的应用

王华伟¹ 高 阳¹ 李海龙¹ 张子奇² 刘 聪² 董维金¹

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春;

2. 吉林大学通信工程学院, 130012, 长春)

摘 要 [目的] 无线通信技术具有灵活性高、适应性强的特点, 能够有效解决有线网络在高速列车运行环境中的诸多问题。但由于高速列车运行环境比较复杂, 无线通信技术在

[方法] 介绍了本次测试的硬件系统, 阐述了 NDT(网络传输时延测试仪) 的构成及待测网桥设备的具体规格。设置了工况 1(楼道环境)、工况 2(贴近地面) 和工况 3(有铁门阻挡) 3 个模拟环境工况, 采用测试软件得到了 3 个工况下信号吞吐量、无线通信单程传输时延的测试数据。对测试数据进行了分析, 找出无线信号在 3 个工况下的传播特性和潜在干扰因素。[结果及结论] 3 种工况对无线信号传输的信号吞吐量和传输时延均有一定程度的影响, 车厢间的金属物质会对无线电波产生显著的屏蔽效应。工况 1 下无线信号的表现最优, 工况 2 次之, 工况 3 最差。

关键词 高速列车; 列车网络控制系统; 无线通信; 信号吞吐量; 传输时延

中图分类号 U285.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.02.029

Application of Wireless Communication Technology in High-speed Train Network Control Systems

WANG Huawei¹, GAO Yang¹, LI Hailong¹, ZHANG Ziqi², LIU Cong², DONG Weijin¹

(1. National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China; 2. College of Communication Engineering, Jilin University, 130012, Changchun, China)

Abstract [Objective] Wireless communication technology, known for its high flexibility and strong adaptability, can effectively address many issues associated with wired networks in the high-speed train operational environment. However, due to the complex nature of this environment, the application of wireless communication technology in this field still faces numerous challenges that require in-depth researches. [Method] The hardware system used in the tests is introduced, detailing the composition of the NDT (network delay tester) and the

specific specifications of the bridge devices under test. Three simulated environmental conditions are set up: Condition 1 (corridor environment), Condition 2 (close to the ground), and Condition 3 (blocked by an iron door). Testing software is used to obtain data on signal throughput and one-way transmission delay of wireless communication under the three conditions. The tested data are analyzed to identify the propagation characteristics of wireless signals and potential interference factors under the three conditions. [Result & Conclusion] The three conditions all have varying degrees of impact on signal throughput and transmission delay of wireless transmission. Metal substances between train compartments exhibit a significant shielding effect on radio waves. The wireless signal performs best under Condition 1, followed by Condition 2, with Condition 3 showing the worst performance.

Key words high-speed train; train network control system; wireless communication; signal throughput; transmission delay

目前, 高速列车的实体重联编组依赖于机械钩和气路连接来实现, 电气钩头通过物理连接方式传输信号。电气钩头触点的机械寿命较短, 难以承受频繁的插拔操作。此外, 大量线缆的使用不仅增加了设备日常检修的复杂程度^[1-2], 还使得在现有列车网络控制系统基础上增加智能化设备变得非常繁琐, 需要重新布线, 这在一定程度上阻碍了高速列车的智能化发展。

采用无线通信技术, 可以更好地掌握列车运行情况, 减少列车损耗和维修成本, 有助于提高列车的智能化程度, 实现更灵活的管理和控制^[3]。欧盟从 2016 年开始实施一个新的车辆项目(项目名称为 Shift2Rail), 该项目提出基于无线传输的新型列车控制网络, 以减少基础设施及轨道交通车辆的开发、维护、运营、翻新等成本, 项目目标是将轨道交通系统的寿命周期成本降低 50%^[4-5]。然而, 列车车厢内外的复杂环境、金属车厢的屏蔽效应等可能会对无线通信的稳定性和可靠性造成一定影响。

本研究结合高速列车的实际运行环境和业务需求,重点评估了无线通信技术在车厢内、车厢间等不同场景下的稳定性和可靠性。

本研究在实验室环境中模拟列车运行的典型中场景,在实验室中对车厢内部、车厢之间等位置进行场景模拟,测试无线通信技术的表现,分析无线信号在这些复杂环境中的传播特性和潜在干扰因素,以期无线通信技术在高速列车网络控制系统中的应用提供科学依据和试验数据支持。

1 测试硬件介绍

本次试验的测试系统由2台上位机测试终端、待测网桥设备及NDT(网络传输时延测试仪)构成。将被测试设备作为黑盒,根据列车中的数据,对测试软件的输入数据进行设置,修改数据脚本的参数,确定测试所用的数据量大小,查看被测设备的输出,并将输出结果与预期输出结果进行对比。图1为测试硬件组成示意图。其中,NDT使用STM32H7单片机搭配电源管理模块、以太网接口模块,可同时支持POE(有源以太网)和Micro-USB(微型USB(通用串行总线)接口)供电,并支持Micro-USB串口数据打印、微秒级精准计时等功能。图1中,实线表示有线连接,虚线表示无线连接。



图1 测试硬件组成示意图

Fig. 1 Diagram of testing hardware composition

NDT的通信协议使用Modbus-UDP(基于UDP(用户数据报协议)的Modbus)协议,接收信息的时间戳、发送信息的时间戳均位于应用层,时间精度为微秒级。主NDT向从NDT发送轮询信息的时间间隔为100 ms。以太网接口的传输速率为100 Mibit/s,可自动适应不同的工作模式和传输速率,以便与不同速率的网络设备进行通信。测试时,使用Micro-USB接口与上位机进行供电连接及数据传输。

测试用的网桥设备型号为TL-S520-5KM,其具体规格为:①无线标准采用IEEE 802.11a/n/ac;②无线速率为867 Mibit/s;③最大发射功率为

21.5 dBm;④内置11 dBi高增益双极化天线;⑤产品尺寸为224 mm(长)×79 mm(宽)×60 mm(高);⑥防尘、防水等级为IP55;⑦整机最大功率为5.13 W。

2 测试场景模拟

本研究在实验室环境下模拟列车运行的典型场景,具体包括车厢内、车厢间的无线通信情况。为了尽可能真实地再现列车运行环境,选择在楼道、空地等环境中进行模拟,重点关注无线信号在这些封闭或半封闭空间中的传播特性和干扰因素。在车厢内和车厢间的模拟场景中,测试了无线信号在不同场景下的表现,以评估信号覆盖的有效性和稳定性。通过这些试验,可以全面了解无线通信技术在列车环境中的实际应用表现,为进一步优化方案提供实证数据和技术支持。测试时,具体分为3个模拟工况:

1) 工况1(楼道环境)。在楼道中模拟列车环境,以评估无线通信技术在类似场景下的实际表现。楼道作为1个封闭或半封闭的狭长空间,具有与列车车厢相似的物理特性(如墙体反射、多径效应和信号衰减等),能够有效模拟列车车厢内部的无线信号传输。由于列车车厢通常为狭长的封闭空间,信号在传输过程中容易受到多径效应的影响,楼道的物理结构能够很好地再现这一现象,从而使得测试结果具有较高的参考价值。此外,楼道的封闭特性使得信号传输容易受到干扰和反射的影响,这与列车在运行过程中因金属结构和乘客密集度带来的信号干扰和反射有相似性。工况1的测试现场如图2所示。

2) 工况2(贴近地面):为了模拟高铁车顶和车底环境下无线信号的传播情况,将待测网桥贴近地面,对其进行信号测量,以模拟AP(无线接入点)位于贴近地面时对信号传播路径及信号强度的影响。

3) 工况3(有铁门阻挡)。采用楼道间的铁门来模拟高铁车厢之间的门,以评估无线通信技术在车厢间的表现。铁门的物理尺寸、结构与高铁车厢间的门相仿,能够有效地模拟车厢间的物理过渡环境。在实际应用中,车厢间的门不仅仅是1个通道,还可能对无线信号传播路径产生影响(如信号的遮挡、反射和衰减等)。通过工况3模拟高铁车厢之间的场景,分析该场景下对信号传输的影响。



图2 工况1的测试现场图

Fig.2 Photo of test site for Condition 1

3 测试软件介绍

3.1 信号吞吐量测试软件

在2台PC(个人电脑)上运行IxChariot软件,对信号吞吐量进行测试。通过2台PC的IP(互联网协议)地址建立连接,设置测试所用数据脚本的参数,最终确定测试所用的数据量大小。

总数据量 D 的计算式为:

$$D = s_{\text{file}} n_{\text{t}} n_{\text{re}}$$

式中:

s_{file} ——单次传输的数据大小;

n_{t} ——每个数据记录的发送次数;

n_{re} ——最终生成数据记录的数量。

为了符合列车数据的特性,本次试验测试取值如下: $n_{\text{t}}=1$; $s_{\text{file}}=1\text{ MiB}$, $n_{\text{re}}=100$ 。列车网络控制系统通常有大量的数据需要频繁传输,如车厢之间的视频监控数据、车载系统的状态数据更新等。这些数据的大小通常在几百KiB到几百MiB之间,因此, $s_{\text{file}}=1\text{ MiB}$ 的设定符合实际应用中数据传输的规模。而通过多次发送,可以模拟出多个并发连接同时传输大数据包的情况,以检验列车网络控制系统的承载能力和稳定性。这种严苛的测试条件能够帮助发现潜在的信号传输瓶颈,测试数据可用于指导后续的技术优化。

3.2 传输时延测试软件

主NDT主动向从NDT发起数据请求,记录发送信息的时间戳。接收到主NDT的数据请求后,从

NDT迅速做出响应,发送回复信息。主NDT接收到回传数据后,记录接收信号的时间戳。在第一次建立连接后,从NDT获得了主NDT的端口号,也开始向主NDT发送数据请求。主NDT在接收到数据请求时,记录收到从NDT主动发来信号的时间戳,并记录发送返回该信号的时间戳。通过串口将所记录的时间戳数据传给上位机进行处理。这个流程确保了通信的准确性和效率,并提供了详细的时间戳记录,供后续分析使用。

4 测试数据分析

本试验主要对信号吞吐量和传输时延的测试结果进行分析。

4.1 信号吞吐量数据分析

图3为工况1下信号吞吐量测试结果。由图3可知:工况1下信号吞吐量表现相对稳定,在整个测试过程中,信号吞吐量没有明显波动,显示出较强的信号传输能力。这说明在相对空旷且无明显障碍物的环境中,无线网络的信号传播较为顺畅,干扰因素较少。

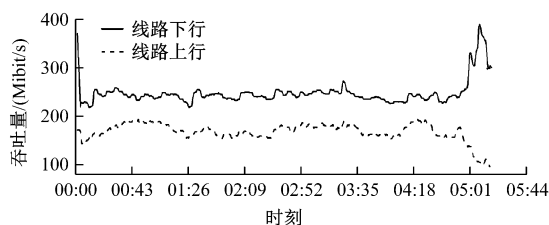


图3 工况1下信号吞吐量测试结果

Fig.3 Signal throughput test results under Condition 1

图4为工况2下信号吞吐量测试结果。由图4可知:工况2下,待测网桥贴近地面进行测试时,信号吞吐量表现相对稳定,信号吞吐量曲线较图3更为平滑且数值略有下降。由此可以推测地面对信号的反射和吸收产生了一定的影响,使得信号传播路径更短,信号吞吐量有所减少。

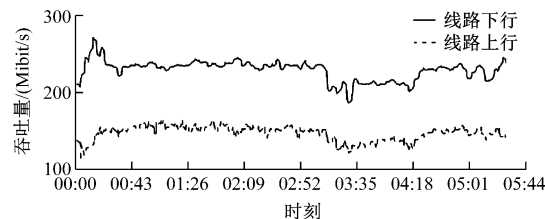


图4 工况2下信号吞吐量测试结果

Fig.4 Signal throughput test results under Condition 2

图5为工况3下信号吞吐量测试结果。由图5可知:工况3由于隔着铁门,信号吞吐量的波动明显增大。这种情况表明铁门作为强反射和吸收信号的障碍物,对信号传输产生了较大的阻碍,导致了信号衰减和信号吞吐量下降。这也验证了金属障碍物对无线信号具有屏蔽作用。

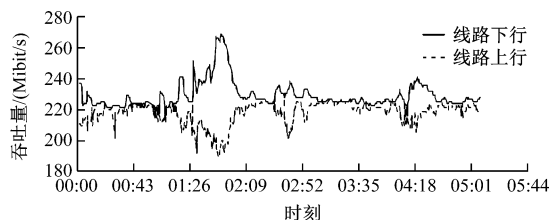


图5 工况3下信号吞吐量测试结果

Fig. 5 Signal throughput test results under Condition 3

上述测试结果验证了在列车运行环境中进行无线通信的实际性能,为进一步优化和设计更具鲁棒性的无线通信系统提供了试验数据。

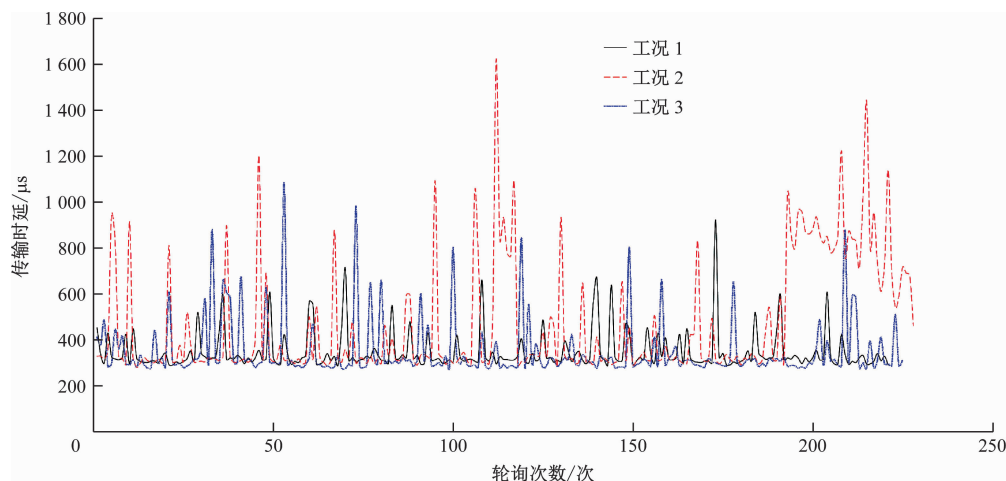


图6 3种工况下无线通信单程传输时延的测试结果

Fig. 6 Test results for wireless communication one-way transmission delay under three working conditions

4.2 传输时延数据分析

列车网络控制系统对传输数据的传输时延有较高的要求。传输时延过大,会导致通信质量下降,影响系统正常有序运行。传输时延测试可辅助识别时延增加原因并减少延迟,确保无线通信的流畅性。传输时延的测试结果可为列车网络控制系统的未来规划和扩展提供重要的数据支持。

图6为3种工况下无线通信单程传输时延的测试结果。由图6可知:工况3下的传输时延明显高于工况1和工况2。这是由于铁门等金属物质会对无线电波产生显著的屏蔽效应,无线信号在穿过铁门时会严重衰减,信号强度减弱,进而导致通信质量下降,传输时延增加。此外,无线信号在遇到铁门时,一部分信号可能被反射或折射,导致信号路径增加,多路径传播下信号接收端会接收到多个不同相位的信号,这些信号会相互干扰,导致传输时延增加。

5 结语

本文的试验结果表明,不同环境对无线信号传输的信号吞吐量和传输时延都有影响。工况1下无线信号的表现最优,工况2次之,工况3最差。

本文的试验研究可为高速列车车厢内、车厢间的无线通信网络部署方案提供重要参考。通过优化设备布局和管理环境,减少无线传输信号的干扰,提升无线通信网络的传输性能。本文的研究结论可为后续的高速列车设计及列车内无线通信网络的优化提供数据支撑。

参考文献

- [1] 黄文杰, 陈志, 梁汝军, 等. 基于无线通信的地铁列车在线灵活编组技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(5): 57. HUANG Wenjie, CHEN Zhi, LIANG Rujun, et al. Research on metro train online flexible marshalling technology based on wireless communication[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(5): 57.
- [2] 张敖翔. CRH5型高速列车通信网络故障诊断系统研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2019. ZHANG Aoxiang. Research on fault diagnosis system of CRH5 high-speed train communication network[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2019.

(下转第147页)

进行优化,以找到最佳的工艺参数组合,进一步提高车体焊接的质量及效率。

参考文献

- [1] 王亚男. 时速 350 km 动车组车顶焊接变形控制与工装夹具设计研究[J]. 焊接, 2018(10): 58.
WANG Yanan. Welding deformation control and fixture design of roof in 350 km/h EMU[J]. Welding & Joining, 2018(10): 58.
- [2] 王亚男. 混合动力型动车组底架端部结构的变形机理及控制方法[J]. 焊接, 2015(1): 44.
WANG Yanan. Distortion and control of end underframe structure in hybrid EMU[J]. Welding & Joining, 2015(1): 44.
- [3] 王亚男, 刘松, 鲍洪阳, 等. 铝合金轨道交通车辆不同枕梁结构的焊接变形机理及差异性分析[J]. 电焊机, 2024, 54(4): 148.
WANG Yanan, LIU Song, BAO Hongyang, et al. Analysis of welding deformation mechanism and differences in different sleeper beam structures of aluminum alloy rail vehicles[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(4): 148.
- [4] 刘计文, 宋长胜. 铝合金车体焊接变形控制研究[J]. 机车车辆工艺, 2016(1): 25.
LIU Jiwen, SONG Changsheng. Study on welding deformation control of aluminum alloy car body[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2016(1): 25.
- [5] 曲双, 王亚男, 鲍洪阳. 轨道交通整体承载式铝合金车体车体挠度的预制方法及试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(2): 31.
QU Shuang, WANG Yanan, BAO Hongyang. Prefabrication method and experimental study of rail transit integral load-bearing aluminum alloy car body deflection[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(2): 31.
- [6] 王亚男. 时速 400 km 动车组车体侧墙焊接模拟仿真及变形控制研究[J]. 电焊机, 2018, 48(11): 94.
WANG Yanan. Study on welding deformation control and simulation of EMU vehicle side wall at 400 km/h[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(11): 94.
- [7] 蒙波, 陈蓉. 轨道交通车辆铝合金车体焊接变形控制研究[J]. 内燃机与配件, 2019(11): 124.
MENG Bo, CHEN Rong. Study on welding deformation control of aluminum alloy car body of rail vehicle[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019(11): 124.
- [8] 程虎, 沈精虎, 戴昆, 等. B 型铝合金地铁枕梁焊接数值模拟分析[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2021, 36(1): 86.
CHENG Hu, SHEN Jinghu, DAI Kun, et al. Numerical simulation way of welding was on the bolster in the metro vehicle of type B aluminum car body[J]. Journal of Qingdao University (Engineering & Technology Edition), 2021, 36(1): 86.
- [9] 刘本末. 地铁车辆车体强度仿真分析与优化设计[D]. 大连: 大连交通大学, 2023.
LIU Benmo. Simulation analysis and optimization design of metro car body strength[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2023.
- [10] 耿明, 王亚男, 肖宇, 等. CR400BF 动车组车体端墙焊接模拟仿真与变形控制研究[J]. 电焊机, 2024, 54(3): 99.
GENG Ming, WANG Yanan, XIAO Yu, et al. Study on welding deformation control and simulation for end wall of CR400BF EMU[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(3): 99.
- [11] 王甫燕. 铝合金地铁车辆底架结构焊接变形控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
WANG Fuyan. Welding deformation control of aluminum alloy subway vehicle underframe structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10
• 第一作者:刘松,高级工程师,124060693@qq.com
通信作者:王亚男,高级工程师,wangyn16041226@sina.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
- (上接第 143 页)
- [3] 窦顺坤. 基于无线通信的列车网络控制平台设计与实现[D]. 大连: 大连交通大学, 2023.
DOU Shunkun. Design and implementation of train network control platform based on wireless communication[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2023.
- [4] 焦曰里, 晏鑫, 苏超. 欧洲下一代轨道交通车辆网络控制技术[EB/OL]. [2024-07-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1152.U.20240725.1016.002.html>.
JIAO Yueli, YAN Xin, SU Chao. Research on next-generation rail vehicle network control technology in Europe[EB/OL]. [2024-07-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1152.U.20240725.1016.002.html>.
- [5] 林鸿, 王林美, 魏艳萍. 关于欧盟 Shift2Rail 计划的研究[J]. 国外铁道车辆, 2019, 56(1): 11.
LIN Hong, WANG Linmei, WEI Yanping. A study of the EU Shift2Rail plan[J]. Foreign Rolling Stock, 2019, 56(1): 11.
- 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10
• 第一作者:王华伟,正高级工程师,whw_huawei@163.com
通信作者:高阳,正高级工程师,013200018545@crrecg.cc
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license